



ESTUDIO QUÍMICO DE VIDRIOS PARA UTILIDAD FORENSE. COMPARATIVA DE MUESTRAS

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Máster en Genética, Química y Física Forense

Autor: Ariadna Elizabeth Conde Eras

Tutor Académico: María Cinta Pujol Baiges

Tutor Profesional: Ángela Sánchez Pereña

Tarragona, septiembre
2024

Índice de contenido

Portada	I
Índice de contenido	II
Resumen.....	1
<i>Abstract</i>	2
Introducción	3
Fundamentos teóricos.....	5
1.1 Propiedades y composición del vidrio	5
1.2 Aplicaciones forenses del análisis de vidrios.....	6
1.3 European network of forensic science institutes (ENFSI).....	6
1.3.1 Directrices que se debe seguir según el manual ENFSI.....	7
1.4 Métodos de análisis químico en vidrios	8
1.5 Microscopía electrónica de barrido con EDX (SEM-EDX)	9
1.6 Otras técnicas relevantes	10
Metodología.....	11
2.1 Obtención de las muestras de vidrio	11
2.2 Preparación de las muestras.....	11
2.3 Descripción de los equipos y técnicas utilizadas.....	11
2.3.1 Microscopio digital modular.....	11
2.3.2 Microscopía electrónica de barrido	12
2.3.3 Microscopía FT - IR	13
Resultados	14
3.1 Análisis macroscópico y microscópico	14
3.2 Análisis mediante microscopía electrónica	16
3.3 Desviación estándar	20
3.4 Análisis mediante microscopía infrarroja	22
Conclusiones	24
Bibliografía	26

Apéndice.....	28
Apéndice A. Imagen de todas las muestras entregadas	28
Apéndice B. Imagen del SEM obtenida en PG-Mossos d' escuadra	28
Apéndice C. Imagen del SEM obtenida en la URV	29

Índice de tablas

Tabla 1. Características de las muestras de vidrio.....	14
Tabla 2. Resultados ESEM.....	16
Tabla 3. Resultados SEM/EDX.....	17
Tabla 4. Desviación estándar de los microanálisis obtenidos por EDS.	21

Índice de figuras

Figura 1. Muestras de vidrio analizadas con el microscopio digital.....	15
Figura 2. Comparativa de dos espectros SEM/EDX	19
Figura 3. Fórmula de la desviación estándar.	20
Figura 4. Espectros comparativos de polímeros obtenidos en microscopio.....	22
Figura 5. Recopilación de todos los vidrios enteros antes de ser analizados.	28
Figura 6. Imagen obtenida con el SEM de la División de policía	28
Figura 7. Imagen obtenida con el ESEM del SRCiT de la URV,	29

Resumen

Este estudio se centró en el análisis químico de once muestras de vidrio con aplicaciones forenses, empleando técnicas avanzadas de microscopía como la microscopía electrónica de barrido y la microscopía infrarroja. El principal objetivo fue identificar y comparar la composición elemental de las muestras de vidrio obtenidas de distintos entornos, tales como vehículos, domicilios y comercios, con el fin de determinar su posible origen y características distintivas. Se identificaron patrones de fractura denominados líneas de Wallner, especialmente en los bordes del vidrio, lo que permitió inferir los mecanismos de fallo, asociados principalmente a tensiones mecánicas. A través de los análisis de microscopía electrónica de barrido (*Scanning Electron Microscope, SEM*), se observó una alta concentración de sílice (SiO_2), acompañada de sodio (Na), calcio (Ca) y magnesio (Mg), elementos que permiten diferenciar tipos de vidrio comerciales e industriales. El estudio también incluyó un análisis exitoso de los polímeros presentes en vidrios laminados mediante microscopía infrarroja (*Fast-Fourier-Infrared, FT-IR*). Aunque la técnica infrarroja no produjo resultados consistentes en las muestras de vidrio, se lograron identificar los polímeros que se encontraban en su interior. Este trabajo destaca la importancia de la colaboración interinstitucional y la integración de diversas técnicas analíticas para mejorar la precisión en la caracterización de fragmentos de vidrio con fines forenses.

Palabras clave: vidrio forense, microscopía, composición química elemental.

Abstract

This study focused on the chemical analysis of eleven glass samples with forensic applications, utilizing advanced microscopy techniques such as Scanning Electron Microscopy (SEM) and Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR). The primary objective was to identify and compare the chemical elemental composition of glass samples obtained from various sources, including vehicles, homes, and commercial establishments, to determine their possible origins and distinctive characteristics. Fracture patterns, specifically known as Wallner lines, were identified along the edges of the glass, providing insight into the failure mechanisms, primarily linked to mechanical stresses. The Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis revealed a high concentration of silica (SiO_2), along with sodium (Na), calcium (Ca), and magnesium (Mg) elements that help differentiate between commercial and industrial glass types. Additionally, the study successfully analyzed the polymers present in laminated glass through Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR). Although the infrared technique did not yield consistent results for the glass samples, it effectively identified the polymers within the glass layers. This research underscores the importance of inter-institutional collaboration and the integration of multiple analytical techniques to enhance the precision of glass fragment characterization for forensic purposes.

Keywords: *forensic glass, microscopy, chemical elemental composition.*

Introducción

El análisis de vidrio es un componente fundamental en la ciencia forense moderna, proporcionando evidencia crucial en casos de accidentes y crímenes. Este trabajo de fin de máster se inspira en las directrices del Manual de Buenas Prácticas del ENFSI (*European Network of Forensic Science Institutes*). Se emprendió con el objetivo de comparar la composición química y las propiedades físicas de las muestras de vidrio utilizando tecnología avanzada de microscopía.

El estudio abordó la necesidad de establecer procedimientos estandarizados y reproducibles para el análisis forense de vidrios, facilitando así la interpretación y comparación de evidencias en el marco judicial. La investigación comparó muestras de vidrio de distintos orígenes, incluidos domicilios, vehículos y comercios, utilizando equipos SEM/EDX en dos localizaciones estratégicas: la unidad central química del PG-Mossos d'Esquadra en Sabadell y el servicio de recursos científicos y técnicos de la Universitat Rovira i Virgili, en el campus Sescelades. La elección de estas ubicaciones se debió a sus capacidades analíticas complementarias y la disponibilidad de tecnología avanzada para la caracterización detallada de materiales.

Los objetivos fueron cumplidos satisfactoriamente, proporcionando una comparación detallada y una evaluación de la variabilidad en las composiciones de vidrio. Se establecieron correlaciones entre las características químicas y físicas del vidrio y sus fuentes de origen, lo cual es esencial para la correcta interpretación forense.

El estudio se benefició de acceso a tecnología de punta y la colaboración interinstitucional. Sin embargo, se enfrentó a desafíos como las diferencias inherentes entre los equipos utilizados de SEM/EDX, que requirió ajustes metodológicos para asegurar la comparabilidad de los datos para obtener resultados fiables. Estas dificultades se mitigaron con la colaboración entre instituciones y colaborar con expertos en el campo de la microscopía, permitiendo un enriquecimiento mutuo del conocimiento y la experiencia en técnicas forenses avanzadas.

Para complementar las técnicas de análisis en el estudio, además de los métodos SEM/EDX previamente mencionados, hemos incorporado el uso de un microscopio digital modular y un microscopio de infrarrojos. La combinación de estos instrumentos ha enriquecido nuestro conjunto de herramientas analíticas, permitiendo una caracterización más completa y profunda de las muestras de vidrio, lo que ha mejorado significativamente la calidad y la profundidad de nuestros análisis.

La metodología aplicada en este estudio ha seguido un enfoque sistemático y detallado, describiendo cada paso desde la preparación de la muestra hasta el análisis final. Los capítulos están ordenados de manera que primero se introduce al lector en la problemática y la relevancia del estudio de vidrios en el contexto forense, seguido por una detallada descripción de las técnicas analíticas utilizadas y finalmente, la presentación y discusión de los resultados obtenidos.

La importancia de esta investigación radica no solo en su contribución a la ciencia forense, proporcionando métodos más precisos y reproducibles para el análisis de vidrios, sino también en su aplicación práctica en la resolución de crímenes y accidentes, ofreciendo herramientas más eficaces para la identificación y comparación de vidrios como evidencia en el ámbito judicial. Este estudio subraya el valor de la colaboración interinstitucional y el avance tecnológico en la mejora de los procedimientos forenses, beneficiando a la sociedad en general por medio de un sistema de justicia más robusto y confiable.

Fundamentos teóricos

1.1 Propiedades y composición del vidrio

El vidrio es un material sólido no cristalino con una estructura interna desordenada, a diferencia de los sólidos cristalinos que tienen un patrón ordenado. Esta falta de ordenación en su estructura atómica hace que el vidrio no tenga un punto de fusión definido, sino que se ablanda gradualmente en un amplio rango de temperaturas (*Girard, James E., 2018*).

En la fabricación de vidrio, se utilizan como reactivos precursores la sílice (dióxido de silicio, SiO_2), la soda (carbonato de sodio, Na_2CO_3) y la cal (óxido de calcio, CaO) y se añade vidrio reciclado también llamado “*cullet*”, para reducir la temperatura de fusión y prolongar la vida útil del horno. Esta composición específica del vidrio lo hace adecuado para una amplia variedad de aplicaciones, desde envases y ventanas hasta parabrisas de vehículos y vajillas de vidrio.

Una de las formas más comunes de vidrio es el de sodio-calcio, que se compone aproximadamente (% en peso) de un 70% de dióxido de silicio (SiO_2), 15 % de óxido de sodio (Na_2O), 10 % de óxido de calcio (CaO) y un 5 % de otros óxidos. Para fabricar este tipo de vidrio, se calienta una mezcla que incluye carbonato de sodio, óxido de calcio o carbonato de calcio, y dióxido de silicio. Este último componente, el SiO_2 , se obtiene comúnmente de la arena, que es esencialmente sílice en su forma natural. Debido a las impurezas de hierro presentes en la arena, este vidrio suele exhibir coloración verde o amarilla (*Rodríguez & Winefordner, 2007*).

La arena proviene principalmente de canteras y depósitos naturales. Su composición puede variar dependiendo de su origen geográfico, pero para la fabricación de vidrio, es fundamental que contenga un alto porcentaje de sílice (dióxido de silicio, SiO_2), generalmente superior al 95%, dado que este es el componente principal del vidrio y le confiere sus propiedades esenciales. Este tipo de arena se denomina comúnmente arena sílica o arena de sílice.

Para modificar sus propiedades y colores, se pueden añadir varios óxidos metálicos al vidrio. Por ejemplo, el óxido de plomo aumenta el brillo, el óxido de cobalto lo hace azul, el óxido de manganeso le da un tono morado, el óxido de cromo lo vuelve verde, y el óxido de cobre puede darle un color rojo o azul-verde o el lavado con estaño que lo convierte en vidrio templado (*Girard, James E., 2018*) (*Rodríguez & Winefordner, 2007*).

1.2 Aplicaciones forenses del análisis de vidrios

Los fragmentos de vidrio encontrados en escenas de crimen, como robos con allanamiento, accidentes de tránsito y vandalismo, constituyen evidencia forense crucial en investigaciones criminales. Estos pequeños fragmentos, también conocidos como muestras de control, pueden compararse con aquellos recuperados del cuerpo de la víctima o las pertenencias del sospechoso, y determinar si tienen un origen común, lo cual puede implicar al sospechoso en el crimen.

Los objetos de vidrio son ubicuos en la sociedad moderna y se utilizan para diversos fines, desde ventanas y parabrisas hasta utensilios y contenedores en el hogar y comercios. Esto resulta en la frecuente presencia de vidrio en la mayoría de los delitos, incluyendo accidentes de atropello y fuga y asesinatos. Dado que las propiedades del vidrio no se deterioran ni corroen con el tiempo, su análisis proporciona evidencia forense duradera y confiable. La ciencia forense utiliza métodos científicos para investigar delitos y examinar pruebas, y el vidrio ha sido particularmente importante en estudios forenses (*Sharma, Acharya, Sarkar, K. Baglaa, & Kumar Pujaribd, 2023*).

1.3 European network of forensic science institutes (ENFSI)

Los manuales del ENFSI proporcionan directrices fundamentales para el análisis forense de vidrio, garantizando la estandarización y calidad en los procedimientos utilizados por laboratorios europeos. Estas guías abarcan aspectos clave como la preparación de las muestras, la medición de propiedades físicas (espesor, color, recubrimientos) y el uso de técnicas avanzadas, como la interferometría. Además, el análisis visual tanto macroscópico

como microscópico del vidrio es un método no destructivo que permite identificar características de fabricación que pueden vincular fragmentos recuperados con una fuente específica, como ventanas o botellas. Las directrices también destacan la importancia de documentar adecuadamente cada etapa del proceso, desde la limpieza hasta el análisis comparativo, siguiendo estándares internacionales como las normativas ISO 9000 y 17025. A pesar de sus beneficios, el análisis forense de vidrio enfrenta limitaciones, como el tamaño y estado de las muestras. No obstante, la estandarización promovida por el ENFSI asegura resultados fiables y aceptados en tribunales, facilitando la cooperación entre laboratorios a nivel internacional (*European Network of Forensic Science Institutes, 2022*).

1.3.1 Directrices que se debe seguir según el manual (ENFSI)

Según el manual del ENFSI, los análisis forenses de vidrio incluyen una serie de etapas:

- Limpieza de la muestra: Se debe limpiar la muestra cuidadosamente para remover impurezas, pero documentando su estado inicial (*European Network of Forensic Science Institutes, 2022*).
- Medición del espesor del vidrio: Esto es crucial para la identificación del tipo de vidrio. Herramientas como micrómetros o calibradores se utilizan para medir el espesor y se debe hacer varias veces para obtener un promedio (*European Network of Forensic Science Institutes, 2022*).
- Análisis de color y recubrimientos: El color y los recubrimientos del vidrio pueden ofrecer indicios sobre su origen. Algunos vidrios tienen recubrimientos especializados lo que puede ser detectable mediante distintas técnicas empleadas para su análisis (*European Network of Forensic Science Institutes, 2022*).

1.4 Métodos de análisis químico en vidrios

Los fragmentos de vidrio pueden ser clasificados en clases específicas mediante métodos de análisis óptico y no óptico, y también pueden ser individualizados por coincidencia de fracturas. En la ciencia forense, el análisis de la composición química y la detección de diferentes elementos químicos son cruciales para determinar la fuente o procedencia de las muestras de vidrio, permitiendo comparar si las muestras provienen de la misma fuente o de fuentes diferentes. Este análisis es fundamental para establecer bases de datos sobre la composición de materiales probatorios y monitorear la concentración de elementos, lo cual es esencial para alcanzar conclusiones lógicas y fundamentadas en las investigaciones forenses (*Sharma, Acharya, Sarkar, K. Baglaa, & Kumar Pujaribd, 2023*).

Dentro de los métodos de análisis químico más utilizados en la actualidad, se encuentran:

- SEM-EDX (Microscopía Electrónica de Barrido con Dispersión de Energía de Rayos X): Técnica que combina la capacidad de obtener imágenes detalladas con el análisis elemental de las muestras.
- IR (Espectroscopía Infrarroja): Método que utiliza radiación infrarroja para identificar y estudiar compuestos a través de sus vibraciones moleculares.
- EDX-RF (Espectroscopía de Dispersión de Energía de Rayos X por Fluorescencia): Técnica utilizada para determinar la composición elemental de una muestra mediante la detección de fluorescencia de rayos X emitida por la muestra.
- LIBS (Espectroscopía de Descomposición Inducida por Láser): Método que analiza la luz emitida por un plasma generado por la irradiación láser para determinar la composición elemental.
- LA-ICP-MS (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente después de Ablación Láser): Combina la ablación láser para muestrear materiales con la espectrometría de masas para un análisis elemental preciso.

- PIXE (Inducción de Partículas por Rayos X Emisores): Método que utiliza haces de partículas para excitar los átomos en una muestra y analizar la emisión de rayos X resultante.
- PIGE (Inducción de Partículas por Emisión de Gamma): Similar a PIXE, pero se enfoca en la detección de rayos gamma para análisis elemental.
- INAA (Análisis de Activación de Neutrones Instrumental): Técnica que mide la radiación gamma emitida por una muestra después de haber sido irradiada con neutrones.

Cada uno de estos métodos ofrece diferentes ventajas y se adecúa a distintas necesidades analíticas, permitiendo manipular trozos pequeños de muestra y proporcionar resultados confiables, lo cual es vital para la integridad de los análisis forenses (*Skoog, Holler, & Crouch, 2017*).

1.5 Microscopía electrónica de barrido con EDX (SEM-EDX)

La microscopía electrónica de barrido SEM (*Scanning Electron Microscope*) permite obtener imágenes de alta resolución y aumento de una muestra mediante la emisión de un haz de electrones finamente enfocado. Este haz interactúa con los átomos de la muestra, provocando la emisión de electrones secundarios y retrodispersados que el microscopio utiliza para generar imágenes detalladas de la superficie. Además, esta interacción también genera fotones en el rango de los rayos X. La técnica de dispersión de energía de rayos X (EDX) aprovecha esta radiación para realizar un análisis elemental de la muestra, identificando los elementos presentes y cuantificando sus concentraciones a través de un espectro característico. Cada elemento tiene un conjunto único de líneas de rayos X, lo que permite diferenciar entre diferentes componentes. Los picos más altos en el espectro EDX indican mayor concentración de un elemento específico. Los picos superpuestos de las mezclas se desestructuran mediante un software informático especial (*Gossman Forensics, 2020*).

Esta técnica es útil para analizar la composición de muestras forenses, la contaminación como en este caso son los vidrios, ya que combina la caracterización morfológica (imágenes) y el análisis elemental.

1.6 Otras técnicas relevantes

En los últimos años, la espectroscopía de ruptura inducida por láser LIBS (*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*) se ha incorporado al análisis forense de vidrios debido a sus numerosas ventajas en comparación con otros métodos tradicionales. Entre sus principales beneficios destaca la rapidez en la adquisición de datos, la mínima necesidad de preparación de las muestras y su alta sensibilidad para detectar una amplia gama de elementos. Esta técnica permite realizar un "*fingerprinting*" del material, es decir, usar el espectro LIBS completo o una lista de picos específicos como identificadores, sin necesidad de analizar individualmente cada componente de la muestra. LIBS se considera una técnica mínimamente invasiva, ya que el área de muestreo es de aproximadamente 100 micrómetros, lo que preserva la integridad de la muestra. Además, su capacidad para recolectar datos directamente en la ubicación original del vidrio hace que sea una herramienta muy prometedora en la ciencia forense. Estas características convierten a LIBS en una opción eficiente y eficaz para identificar y analizar muestras de vidrio en contextos forenses, como la escena del crimen, donde el manejo cuidadoso de la evidencia es crucial (*Gutiérrez, y otros, 2012*).

Metodología

2.1 Obtención de las muestras de vidrio

Se recibió un total de 11 muestras de vidrio de diversas procedencias: domicilios, comercios y vehículos. Estas muestras fueron proporcionadas por la unidad central de química del PG-Mossos d'Esquadra en Sabadell, como parte de esta investigación con enfoque forense comparativo.

2.2 Preparación de las muestras

Las muestras de vidrio fueron inicialmente cortadas a un tamaño manejable utilizando un cortador de cristales específico. Los vidrios provenientes de vehículos ya se encontraban en las dimensiones adecuadas para su análisis directo. Posteriormente, se fragmentaron hasta obtener piezas de aproximadamente 1 cm.

Para los análisis en SEM, los fragmentos menores de 1 cm se colocaron en un portamuestras tipo pin "*stub*" con adhesivo de doble cara con recubrimiento de carbono, mejorando la conductividad eléctrica y asegurando la estabilidad de las muestras durante el análisis.

2.3 Descripción de los equipos y técnicas utilizadas

2.3.1 Microscopio digital modular

Utilizamos un sistema de microscopio digital modular LEICA modelo DMS1000 para observar y medir fragmentos de vidrio superiores a 1 cm. Este equipo permitió una inspección detallada y la obtención de imágenes digitales de alta resolución, facilitando la documentación de características específicas de cada muestra.

2.3.2 Microscopía electrónica de barrido

Aplicando la previa preparación de la muestra indicada anteriormente, los primeros análisis se realizaron en un microscopio electrónico de barrido ambiental (ESEM) en el Servicio de Recursos Científicos y Técnicos (SRCiT) de la Universitat Rovira i Virgili (URV). Las imágenes y los análisis fueron obtenidos con un microscopio modelo Quanta 600 de FEI Company, configurado con una fuente de emisión de campo (FEG) basada en un cátodo de monocristal de tungsteno. Este sistema proporciona una emisión de electrones más coherente y enfocada, lo que permite obtener imágenes de alta resolución y realizar análisis detallados a nivel nanométrico.

Las condiciones operativas durante el análisis fueron las siguientes: la magnificación utilizada fue de 150x, con una distancia de trabajo (WD) de 8,3 mm y un voltaje de aceleración (HV) de 20,00 kV. Se emplearon varios detectores, incluidos BSED (*Backscattered Electron Detector*, detector de electrones retrodispersados), LFD (*Large Field Detector*, detector de electrones secundarios) y el modo Mix para capturar imágenes bajo diferentes condiciones de contraste. El campo de visión horizontal (HFW) fue de 1,38 mm, con una presión de $6,76 \times 10^{-1}$ Torr y una corriente del haz de 0,19 nA. El tamaño de las muestras observadas varía entre los 200 μm hasta 1 mm aproximadamente.

Con el objetivo de obtener la máxima cantidad de información y contrastar los resultados previos, se llevaron a cabo sesiones adicionales utilizando un microscopio electrónico de barrido SEM-EDX (modelo EVO 10 de ZEISS) equipado con un filamento de tungsteno. Este equipo, ubicado en la central de investigación científica de los Mossos d'Esquadra, permitió realizar análisis detallados de las muestras. Durante las sesiones, se empleó también un detector de electrones secundarios y un detector de electrones retrodispersados.

Las condiciones experimentales del análisis fueron las siguientes: se empleó una magnificación de 61x, con un voltaje de aceleración (AV) de 25,0 kV y una distancia de trabajo (WD) de 13,7 mm. El análisis EDX se realizó utilizando un detector Oxford EDS Ultim Max

65, con una resolución energética de 20.0 eV por canal y un rango energético de 20 keV. Se trabajó en alto vacío con una presión de trabajo de 10^{-5} Pa. El campo de visión horizontal (HFW) para esta magnificación fue de 4.2 mm y la corriente del haz fue de 0.4 nA. El tamaño de las muestras observadas varía entre los 200 μm hasta 1 mm aproximadamente.

En ambos casos, tres puntos representativos de cada muestra fueron seleccionados y estudiados para garantizar una caracterización completa y precisa. El microanálisis se realizó utilizando el software AZtec de Oxford.

2.3.3 Microscopía FT - IR

Fragmentamos pequeñas porciones de las muestras de vidrio utilizando un mortero, hasta obtener partículas con una textura de arena o polvo. Además, se extrajeron fragmentos del polímero intercalado entre capas de vidrio, material comúnmente utilizado en la fabricación de ventanas blindadas. Este procedimiento permitió obtener una distribución de tamaño de partícula adecuada para el análisis espectroscópico.

El estudio se llevó a cabo utilizando un microscopio FT-IR modelo LUMOS II, equipado con un detector MCT (*Mercury Cadmium Telluride*) de alta sensibilidad, de la marca Tampa Merck. Este equipo permitió la caracterización espectroscópica de las muestras, facilitando la identificación de las composiciones químicas tanto del vidrio pulverizado como del polímero intercalado.

Resultados

3.1 Análisis macroscópico y microscópico

En la evaluación de la apariencia física de las muestras de vidrio analizadas, se observó que la mayoría presenta una alta transparencia, aunque exhiben variaciones en sus tonalidades. Además, se analizó el grosor de cada muestra, una propiedad física fundamental, que fue medido con un calibrador analógico con una resolución espacial de 0.02 mm. Estas características se resumen y detallan en la **Tabla 1**, proporcionando una referencia visual y descriptiva de las variaciones observadas entre ellas.

Tabla 1. Características de las muestras de vidrio. Espesor obtenido con un calibrador analógico de una resolución espacial de 0.02 mm.

Muestra	Procedencia	Propiedad	Acabado	Espesor Milímetros
1	Ventana	Turbidez	Incoloro	3.5
2	Espejo	Opaco	Bronce	5
3	Espejo	Opaco	Rosa	4.5
4	Ventana	Turbidez	Incoloro	4
5	Ventana	Turbidez	Incoloro	5
6	Ventana	Turbidez	Incoloro	5
7	Ventana	Translúcido	Gris	8
8	Espejo	Translúcido	Marrón	5
9	Escaparate	Translúcido	Incoloro	6
10	Cuadro	Translúcido	Incoloro	2.5
11.1	Vehículo	Translúcido	Negro	5
11.2	Vehículo	Translúcido	Incoloro	3
11.3	Vehículo	Translúcido	Azul	4
11.4	Vehículo	Translúcido	Celeste	4

La utilización del microscopio digital Leica DMS1000 ha sido fundamental para investigar el origen y la propagación de las fracturas en las muestras de vidrio examinadas. Este análisis nos permite identificar con precisión el punto inicial de la rotura, comúnmente referido como el origen de la fractura. A partir de este origen, se observaron líneas de fractura conocidas como "líneas de Wallner", que se irradian siguiendo las ramas de la fractura hacia el exterior desde el punto de inicio.

Las líneas de Wallner permiten determinar la dirección de la fractura, ya que, independientemente del tipo de vidrio, las fracturas siempre se proyectan hacia la cara cóncava de estas marcas. Los resultados, ilustrados en cuatro ejemplos distintos que se presentan en la **Figura 1**, estos demuestran que las fracturas, siguen el patrón típico para una fractura por estrés mecánico, su origen no está a 90° del borde del vidrio, por lo que se trata de una fractura por tensión por flexión. Además, estas rupturas se propagan más de dos pulgadas como una fractura de una sola línea desde el origen que apunta a una ruptura de baja tensión. Las fracturas mecánicas de baja tensión a menudo se producen al doblarse a menos de 1,500 psi (10,4 Mpa) (*Vitro Vidrio Arquitectónico*, 2013).

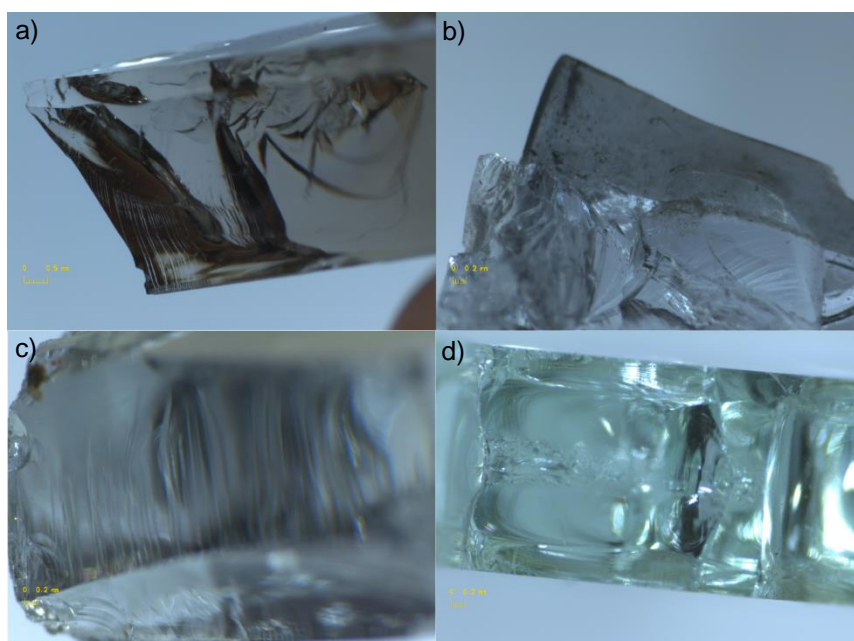


Figura 1. Muestras de vidrio analizadas con el microscopio digital Leica DMS1000. a) Vidrio de una ventana, b) Vidrio laminado gris, c) Ventana tipo espía, d) Ventana de un Vehículo.

Las observaciones de las cuatro muestras presentadas en la **Figura 1** confirman que todas ellas se fracturaron de derecha a izquierda. Este comportamiento uniforme de la fractura confirma que fue realizado bajo estrés mecánico.

Si bien en esta investigación solo se analizaron vidrios rotos por estrés mecánico, las líneas de Wallner aportaron información valiosa para establecer un patrón de fractura que podría ser aplicable en el ámbito forense.

3.2 Análisis mediante microscopía electrónica

Los estudios realizados en las dos instituciones distintas permitieron comparar la metodología propuesta por el ENFSI. Estas técnicas facilitaron la identificación precisa de la composición elemental de cada muestra, proporcionando datos detallados sobre la proporción de los elementos presentes.

Los análisis obtenidos mediante ESEM-EDX en la Universitat Rovira i Virgili (URV), descrita en la *Tabla 2* indican una alta concentración de sílice (SiO_2), con porcentajes que varían entre 46.18 % y 60.72 %. La presencia de sodio (Na), que oscila entre 7.05 % y 10.29 %. Estos altos valores de Na son indicativos del uso de compuestos calco-sódicos, característicos del vidrio comercial. Además, el calcio (Ca), presente en concentraciones de hasta 6.79 % en la muestra 10, confirma el uso de este ion como estabilizador, lo que mejora la durabilidad del vidrio. Por otro lado, la presencia de magnesio (Mg), con concentraciones de entre 1.45 % y 2.67 %, contribuye a aumentar la resistencia mecánica del vidrio. Estos resultados reflejan una composición elemental típica de los vidrios industriales, en los que los iones como Na^+ y Ca^{2+} juegan un papel crucial en las propiedades finales del material, como la resistencia térmica y la estabilidad química (*Rincón, 2006*).

Tabla 2. Resultados ESEM – microanálisis rayos X. Utilizando un equipo Quanta 600 de FEI Company con las características de medida descritas en la sección 2.3.2, equipo de la URV.

Muestra	Wt%												
	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Cr	Fe	Sn	Co	Mo	Sr
1	53,52	9,91	2,28	0,50	29,60	0,36	5,93						
2	60,72	9,42	2,17	0,28	23,07	0,14	4		0,19				
3	49,64	8,61	2,67	0,47	32,44	0,16	6,09		0,25				
4	59,87	6,56	1,65	0,44	24,82	0,52	6,15						
5	47,34	7,05	1,45	0,69	18,01	0,27	3,83						
6	55,92	7,29	1,69	0,51	26,86	0,41	6,8						0,53
7	59,6	9,24	2,37	0,33	24,15		4,11					0,31	
8	51,96	10,29	2,33	0,38	27,99		5,72	0,39	0,77		1,78		
9	54,38	9,5	2,58	0,4	28,03		5,12						
10	51,3	8,58	2,36	0,3	30,49	0,18	6,79						
11.1	47,92	8,39	2,12	0,63	33,79	0,43	5,73		1				
11.2	51,93	9,12	2,18		33,08	6,08			0,65	1,06			
11.3	53,39	9,7	2,01	0,38	28,24	0,13	5,07		1,08				
11.4	46,18	7,86	1,95	0,43	28,21	0,22	4,8		0,5	1,42			

Por otro lado, el análisis realizado mediante SEM-EDX en los laboratorios de los Mossos d'Esquadra, descritos en la **Tabla 3**, proporcionó resultados consistentes con los obtenidos en la URV, pero también reveló detalles específicos sobre la presencia y concentración de ciertos iones. Se observó una alta concentración de sílice (SiO_2) en todas las muestras, destacándose la muestra 4 con un 60.49 %. Asimismo, el sodio (Na) se identificó en niveles elevados, con un promedio cercano al 10 %, sugiriendo el uso de compuestos de sodio como Na_2O , los cuales facilitan la fusión y manipulación del material. Adicionalmente, se detectaron concentraciones de magnesio (Mg) y calcio (Ca), con valores de hasta 3.39 % y 5.12 %, respectivamente, que actúan como estabilizadores, mejorando la resistencia mecánica y química del vidrio. También se identificaron pequeñas cantidades de cromo (Cr) y tungsteno (W) en varias muestras. Aunque se encuentran en concentraciones bajas, estos elementos traza pueden influir en las propiedades de los mismos.

Tabla 3. Resultados SEM/EDX. Utilizando el equipo EVO 10 de ZEISS y las características de medida descritas en la sección 2.3.2 situado en los laboratorios de los mossos d'esquadra.

Muestra	Wt%											
	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Sn	Co	Cr	W
1	55,71	12,08	2,62	0,74	25,28	0,22	3,35					
2	55,99	12,01	2,96	0,34	25,49	0,14	3,2	0,10				
3	57,28	11,75	3,39	0,45	24,7	0,08	2,16	0,08	0,35			
4	60,49	12,1	3,31		22,16	0,06	1,55	0,04	0,3			
5	59,56	10,44	1,6		25,1		3,31					
6	51,14	9,95	2,7	0,76	30,33		5,12					
7	52,11	10,79	3,05		29,19		4,86					
8	55,37	9,97	2,76		26,87		4,11	0,22		0,76	0,22	
9	51,38	10,43	2,93	0,54	29,4		5,19					0,49
10	51,82	10,94	3,01	0,53	29,28		4,77					
11.1	50,44	9,91	2,54	0,68	32,04	0,5	3,99	0,46				
11.2	50,06	10,59	2,33		31,79		4,99		0,71			
11.3	54,12	11,93	2,38		27,27		3,56	0,74				
11.4	49,32	9,72	2,59		32,27		4,93		1,11			0,2

Estos resultados reflejan una composición elemental típica tanto de vidrios comerciales como industriales, caracterizados por su alto contenido de sílice (SiO_2). La presencia de elementos como magnesio (Mg), aluminio (Al) y sodio (Na) en proporciones

variables sugiere el uso de minerales naturales como la albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y la wollastonita (CaSiO_3) en la fabricación de las muestras analizadas. Esto es particularmente evidente en vidrios de ventanas (muestras 1, 4, 5, 6), laminados (muestras 7, 9) y espejos (muestras 2, 3, 8), donde la variabilidad en la proporción de estos elementos influye en las propiedades ópticas y mecánicas del vidrio.

Además, los análisis indicaron la presencia de compuestos como Na_2O y CaO , esenciales para mejorar la resistencia y estabilidad del material. Las trazas de óxido de cromo (III) (Cr_2O_3) y tungsteno (W) sugieren posibles contaminaciones en el proceso de fabricación o por exposición ambiental, lo cual termina influyendo en las propiedades ópticas, como en los vidrios espejados (muestras 2, 3, 8) y laminados grises (muestra 7). En el caso de los vidrios automotrices (muestras 11.1 a 11.4), la composición refleja la incorporación de materiales que mejoran la resistencia mecánica y la seguridad, como se espera en aplicaciones vehiculares. En general, la composición elemental obtenida sugiere una mezcla de vidrios comerciales, destinados a aplicaciones decorativas o arquitectónicas, y vidrios industriales especializados, como los laminados y automotrices, confirmando que los fragmentos analizados provienen de diversos orígenes comerciales e industriales.

Otro de los resultados que pudimos constatar es la relación entre la composición elemental y la coloración de las muestras, en la muestra 11.3, de color azul, se detectaron trazas de óxido de cobalto (CoO), la presencia de este compuesto es coherente con la literatura, donde se menciona que es un colorante utilizado en la fabricación de vidrios azulados. En las muestras 2 y 3, los colores bronce y rosa, respectivamente, podrían estar influenciados por óxidos de hierro y manganeso, ya que el Fe_2O_3 genera tonalidades verdes y marrones, mientras que el MnO_2 es responsable de los colores rosados. La muestra 7 y 11.1, de color gris y negro, podría deberse a la presencia de óxidos de hierro en diferentes estados de oxidación, los cuales generan colores oscuros o grises. Para la muestra 8, de color marrón, la combinación de óxidos de hierro y calcio es típica de vidrios que presentan tonalidades marrones. Finalmente, en la muestra 11.4, de color celeste, la presencia de cobre

o hierro en menor concentración puede explicar la tonalidad observada, ya que los óxidos de cobre generan tonos verdes o azul-verde, mientras que los óxidos de hierro también contribuyen a las variaciones de color (Rincón, 2006). Este análisis no solo confirma la importancia de los óxidos metálicos en la coloración de los vidrios, sino que también resalta cómo las variaciones en las concentraciones de estos compuestos pueden influir en la apariencia final del material, como ya ha sido documentado en estudios previos.

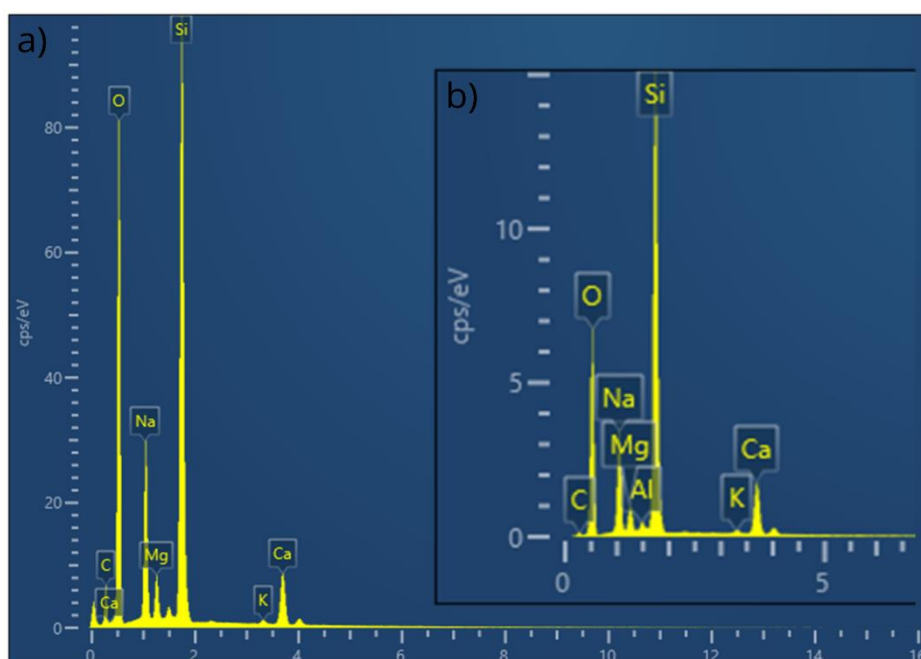


Figura 2. Comparativa de dos espectros SEM/EDX. Obtenido de la muestra 1.
 a) Espectro proporcionado por la división científica de los Mossos d'Esquadra.
 b) Espectro proporcionado por el SRCiT de la URV.

Al comparar los resultados obtenidos en ambas instituciones, se observa una notable similitud, lo que confirma la eficacia de la metodología empleada en ambos microscopios electrónicos de barrido. En la **Figura 2** se pueden observar los espectros de la muestra 1 que se pueden constatar con los resultados de la **Tabla 2** y **Tabla 3**, correspondiente a un vidrio de ventana. Al analizar los resultados de dicha muestra, obtenidos en los laboratorios de la URV como de los Mossos d'Esquadra, se detectan algunas variaciones en los elementos químicos, las cuales pueden atribuirse a las diferencias en las condiciones experimentales, como el uso de bajo vacío en la URV y alto vacío en los Mossos.

La sílice (SiO_2), principal componente, presenta un 29.60 % en la URV y 25.28 % en los Mossos, mientras que el oxígeno (O) es bastante consistente, con 53.52 % en la URV y

55.71 % en los Mossos. El sodio (Na) muestra mayor discrepancia, con 9.91 % en la URV y 12.08 % en los Mossos, probablemente debido a diferencias experimentales entre los equipos. Magnesio (Mg) y aluminio (Al) presentan variaciones menores, dentro de un rango aceptable. En contraste, el calcio (Ca) varía más notablemente, con 5.93 % en la URV frente a 3.35 % en los Mossos, lo que podría reflejar la sensibilidad de los equipos para detectar elementos traza. En general, aunque existen algunas diferencias en las concentraciones de ciertos elementos, la composición global es coherente entre ambos análisis, y las variaciones observadas son razonables dadas las diferencias entre los equipos SEM y ESEM utilizados en cada laboratorio.

3.3 Desviación estándar

La desviación estándar es una medida estadística que refleja el grado de dispersión o variabilidad de un conjunto de datos respecto a su media (*Pérez Atanasio, 2015*). En este estudio, la desviación estándar se calculó para cada uno de los elementos presentes en las muestras de vidrio representados en la **Tabla 4**, con el fin de evaluar la homogeneidad de su composición química.

El cálculo de la desviación estándar se realizó utilizando la siguiente fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Figura 3. Fórmula de la desviación estándar. Donde: σ es la desviación estándar, N es el número total de datos, x_i representa cada valor individual de la concentración del elemento en una muestra y \bar{x} es el valor promedio de la concentración de dicho elemento.

Este valor nos indica cuánto se desvían las concentraciones de cada elemento respecto al valor promedio obtenido. Un valor bajo de desviación estándar sugiere que las concentraciones son relativamente consistentes entre las muestras, mientras que un valor elevado indica una mayor variabilidad entre ellas.

Tabla 4. *Desviación estándar de los microanálisis obtenidos por EDS.*

Establecimiento	Wt%								
	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Sn
URV	4,66	1,13	0,35	0,12	4,27	1,75	1,00	0,35	0,25
Mossos d' Escuadra	3,57	0,90	0,45	0,16	3,14	0,18	1,14	0,27	0,38

En el análisis realizado con ESEM en la URV, la desviación estándar del oxígeno (O) fue de 4.66 %, lo que indica una alta dispersión en sus concentraciones entre las muestras. Esto sugiere una composición no homogénea. De forma similar, el silicio (Si) mostró una desviación estándar de 4.27 %, reflejando una variabilidad significativa que sugiere variaciones en las materias primas o los métodos de producción.

Por otro lado, el magnesio (Mg) y el sodio (Na) presentaron desviaciones estándar más bajas, de 0.35 % y 1.13 % respectivamente, lo que indica una mayor homogeneidad en su distribución. Esto sugiere que estos elementos están presentes de manera más uniforme, posiblemente debido a una mayor consistencia en las fuentes de los materiales o en los procesos de fabricación. El calcio (Ca), con una desviación estándar de 1.00 %, mostró una dispersión moderada en su concentración.

En el análisis de los Mossos d'Escuadra, los resultados fueron similares en cuanto a variabilidad. El oxígeno (O) presentó una desviación estándar de 3.57 %, algo menor que en la URV, lo que sugiere una variabilidad ligeramente inferior. El silicio (Si) mostró una desviación estándar de 3.14 %, lo que también indica una variabilidad considerable, aunque más baja que en los datos de la URV. En el caso del sodio (Na), la desviación estándar fue de 0.90 %, lo que refleja una mayor consistencia en su concentración en comparación con los resultados de la URV.

En general, ambos análisis revelan una mayor variabilidad en los elementos como el oxígeno (O) y el silicio (Si), lo que sugiere que los procesos de producción o las materias primas no eran completamente uniformes. En cambio, el magnesio (Mg) y el sodio (Na) mostraron una menor variabilidad, lo que refleja una distribución más consistente. Estos resultados son coherentes en ambos análisis, aunque en la URV se observa una dispersión

ligeramente mayor. Las diferencias en la desviación estándar podrían estar influenciadas por las condiciones de vacío empleadas: bajo vacío en la URV y alto vacío en los Mossos d'Esquadra, lo que pudo haber afectado tanto la calidad de las imágenes como la precisión del análisis elemental, contribuyendo a las variaciones observadas entre las muestras.

3.4 Análisis mediante microscopía infrarroja

En los análisis de vidrios mediante microscopía infrarroja, no se obtuvieron resultados coherentes que permitieran avanzar en el estudio de la composición de los mismos. Por esta razón, se decidió descartar los datos obtenidos para el análisis de vidrios. Sin embargo, se analizaron con éxito los polímeros presentes en dos de las muestras de vidrios laminados, obteniendo su composición química.

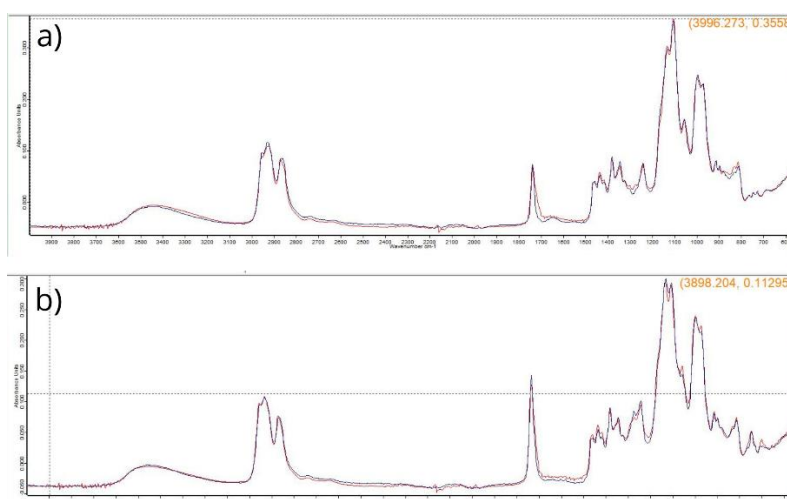


Figura 4. Espectros comparativos de polímeros obtenidos en microscopio IR. Se muestran los espectros de polímeros extraídos de las muestras 7 y 9 los cuales corresponden a vidrios laminados:

- a) Espectro de polímeros presentes en la muestra 9 (escaparate blindado).
- b) Espectro de polímeros presentes en la muestra 7 (ventana blindada).

Los resultados del análisis infrarrojo de la muestra 9, cuyos espectros se presentan en la **Figura 4**, corresponden al polímero ubicado entre capas de vidrio de 3 mm de grosor cada una, pertenecientes a un escaparate blindado, y revelaron la presencia de los siguientes compuestos: un 60.1 % de copolímero de alcohol vinílico y butiral de vinilo (CAS 27360-07-2, fórmula molecular $C_8H_{14}O_2 \times C_4H_6O_2 \times C_2H_4$), un 22.9 % de pentil octanoato (CAS 638-25-5, fórmula molecular $C_{13}H_{26}O_2$), y un 17.0 % de polioxietileno alquil amida. Los compuestos

como las alquil amidas o los copolímeros complejos suelen tener estructuras variables, ya que su composición exacta cambia en función de los grupos alquilo que contengan. Al tratarse de un grupo de sustancias con variaciones estructurales, no siempre tienen un número CAS único, ya que este depende de la combinación precisa de sus componentes. Frecuentemente, estos compuestos son mezclas o series de polímeros con diferentes longitudes de cadenas alquilo y grados de polimerización, lo que dificulta asignarles una fórmula química única y precisa.

En la muestra 7, correspondiente al polímero ubicado entre dos capas de vidrio de 4 mm cada una, que se muestra en la **Figura 4** y proviene de una ventana blindada, los resultados revelaron un 58.8 % de copolímero de alcohol vinílico y butiral de vinilo (CAS 27360-07-2, fórmula molecular $C_8H_{14}O_2 \times C_4H_6O_2 \times C_2H_4$), un 28.6 % de dihexil azelato (CAS 109-31-9, fórmula molecular $C_{21}H_{40}O_4$), y un 12.6 % de di-2-butoxietil ftalato (CAS 117-83-9, fórmula molecular $C_{20}H_{30}O_6$).

Los resultados corresponden a polímeros intercalados entre capas de vidrios, revelando la presencia de compuestos poliméricos típicos en vidrios industriales. En ambas muestras se identificó una alta proporción de copolímero de alcohol vinílico y butiral de vinilo (PVB), un material ampliamente utilizado en la fabricación de vidrios laminados debido a su capacidad para mejorar la resistencia a impactos, la flexibilidad y la seguridad, al mantener unidos los fragmentos tras una rotura. Adicionalmente, en la muestra 9 se detectó un 22.9 % de pentil octanoato y un 17.0 % de polioxietileno alquil amida, que actúan como plastificantes y modificadores de superficie, contribuyendo a mejorar la durabilidad y resistencia del vidrio. En la muestra 7, la presencia de dihexil azelato (28.6 %) y di-2-butoxietil ftalato (12.6 %) refuerza las propiedades mecánicas y la flexibilidad del polímero intercalado. Estos polímeros se emplean comúnmente en la industria del vidrio de seguridad por su capacidad para absorber energía, aumentar la resistencia al impacto y mejorar la estabilidad térmica, lo que justifica su uso en vidrios blindados y de alta resistencia.

Conclusiones

La investigación realizada permitió una caracterización detallada de las muestras de vidrio mediante diversas técnicas analíticas de microscopía. A través del análisis macroscópico y microscópico digital, se identificaron patrones de astillamiento en los bordes del vidrio, así como los puntos clave de inicio de las fracturas. Estas fracturas presentan marcas conocidas como líneas de Wallner, que actúan como huellas indicadoras del origen de la ruptura. Estas líneas se irradian desde el punto de inicio de la fractura y proporcionan información crucial sobre la dirección y la causa de la falla. Este hallazgo es fundamental para comprender los mecanismos de fallo del vidrio bajo tensiones mecánicas y térmicas, lo que contribuye significativamente a su identificación en contextos forenses.

En los análisis realizados mediante SEM y ESEM, se identificó una alta concentración de sílice (SiO_2) en las muestras de vidrio, acompañado de elementos como sodio (Na), calcio (Ca) y magnesio (Mg), los cuales contribuyen a la estabilidad y resistencia del material. Además, la presencia de compuestos metálicos como óxido de cobalto (CoO), óxido de hierro (Fe_2O_3) y trazas de óxido de manganeso (MnO_2) se asoció con la coloración de los vidrios. El CoO fue responsable de los tonos azulados, el Fe_2O_3 de colores marrones y verdes, mientras que el MnO_2 generó tonalidades rosadas. Estos compuestos metálicos no solo aportaron características ópticas, sino que también influyeron en las propiedades mecánicas y térmicas de las muestras de vidrios analizadas.

A nivel comparativo, se observó una notable similitud entre los resultados obtenidos en la URV y los Mossos d'Esquadra, lo que valida la metodología utilizada en ambos laboratorios y confirma la utilidad del SEM/EDX en la caracterización de vidrios. Las pequeñas discrepancias en los porcentajes de ciertos elementos, como el sodio o el calcio, pueden atribuirse a las condiciones experimentales de los equipos utilizados, como las diferencias en vacío o la calibración.

Por otro lado, los análisis infrarrojos no proporcionaron resultados coherentes en el caso de los vidrios, por lo que no se pudieron obtener conclusiones sobre su composición con

esta técnica. Sin embargo, el análisis de los polímeros presentes en vidrios laminados fue exitoso, permitiendo la identificación de compuestos como el copolímero de alcohol vinílico y butiral de vinilo, pentil octanoato y polioxietileno alquil amida. Estos compuestos son utilizados principalmente para mejorar las propiedades de los vidrios laminados, como su resistencia al impacto y durabilidad.

En resumen, esta investigación demuestra que el análisis mediante microscopía electrónica de barrido es eficaz para caracterizar fragmentos de vidrio en un contexto forense, permitiendo establecer su origen y composición de manera precisa. No obstante, se recomienda que futuros estudios optimicen los parámetros de la microscopía infrarroja y consideren la implementación de técnicas complementarias como LIBS o espectrometría de masas para mejorar la precisión en la identificación de elementos traza y compuestos orgánicos presentes en las muestras.

Bibliografía

- European Network of Forensic Science Institutes. (29 de 11 de 2022). Best Practice Manual for the Forensic Identification and Comparison. *ENFSI-PGT-BPM-02*.
- European Network of Forensic Science Institutes. (12 de 12 de 2022). Guideline for the forensic examination of visual characteristics of control and recovered samples of glass. *ENFSI PGT-GDL-007*, 1 - 6.
- Girard, James E. (2018). Forensic Analysis of Glass. En J. E. Girard, *Criminalistics: Forensic Science, Crime, and Terrorism* (págs. 97 - 112). Jones & Bartlett Learning. doi:ISBN: 9781284142617
- Gossman Forensics. (2020). How Does Scanning Electron Microscope/Energy Dispersive X-ray (SEM/EDX) Work? *A Division of ChemRight Laboratories, Inc.*, 1.
- Gutiérrez, P., García, A., Catalán, E., Pardo, A., Castello, R., & Barrio, J. (2012). Estudio analítico de un conjunto de vidrios procedentes del yacimiento de la Villa de El Saucedo utilizando las técnicas SEM-EDX y LIBS. *Estudos Arqueológicos De Oeiras*(19), 89 - 94. Obtenido de <https://eao.oeiras.pt/index.php/DOC/article/view/210>
- Pérez Atanasio, J. M. (Abr - Jun de 2015). Principios de bioestadística para comprender los resultados reportados en los artículos científicos. *Orthotips, Volumen 11*(Número 2), 91 - 95.
- Rincón, J. (2006). Materias primas para la industria del vidrio. *Utilización de rocas y minerales industriales*, 49 - 74.
- Rodríguez, M., & Winefordner, J. (2007). Análisis Forense Elemental del Vidrio. *Revista de Química*, 15 - 20.
- Sharma, V., Acharya, R., Sarkar, A., K. Baglaa, H., & Kumar Pujarib, P. (10 de May de 2023). Chemical characterization of automobile windshield glass samples by nuclear and radio-analytical techniques namely SEM-EDX, ED-XRF, PIXE, PIGE, and INAA and potential of external (in air) PIGE and INAA in conjunction with chemometrics for glass

forensics. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*(38), 1307-1328. doi:DOI:
10.1039/d3ja00006k

Skoog, D., Holler, F., & Crouch, S. (2017). Principles of Instrumental Analysis. *Cengage Learning*.

Vitro Vidrio Arquitectónico. (2013). Fractura de vidrio: modo de falla y cálculo de estrés. *Documento técnico de vidrio | TD-110, 1 - 12*.

Apéndice

Apéndice A. Imagen de todas las muestras entregadas para realizar el correspondiente análisis.

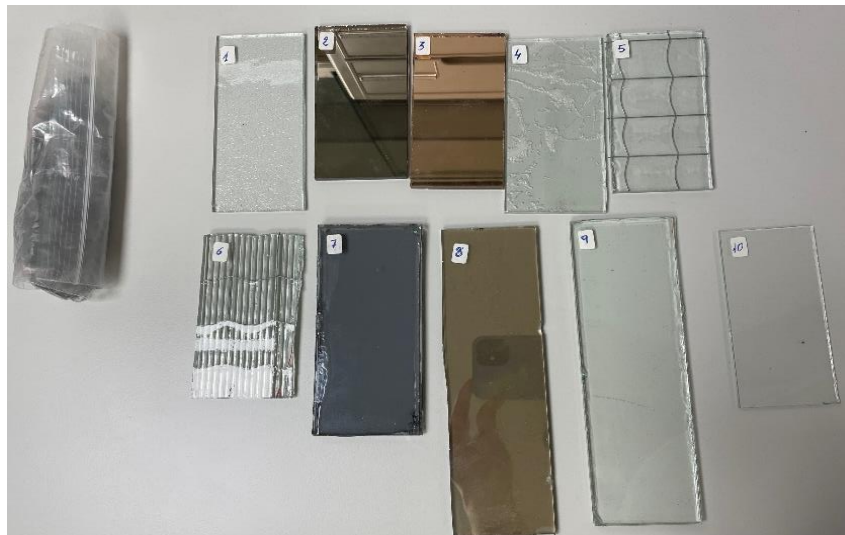


Figura 5. Recopilación de todos los vidrios enteros antes de ser analizados. 1) Ventana, 2) Espejo, 3) Espejo, 4) Ventana, 5) Ventana, 6) Ventana, 7) Ventana, 8) Ventana, 9) Escaparate, 10) Cuadro, 11.1, 11.2, 11.3, 11.4 Vehículos

Apéndice B. Imagen del SEM obtenida en los laboratorios de los Mossos d' escuadra

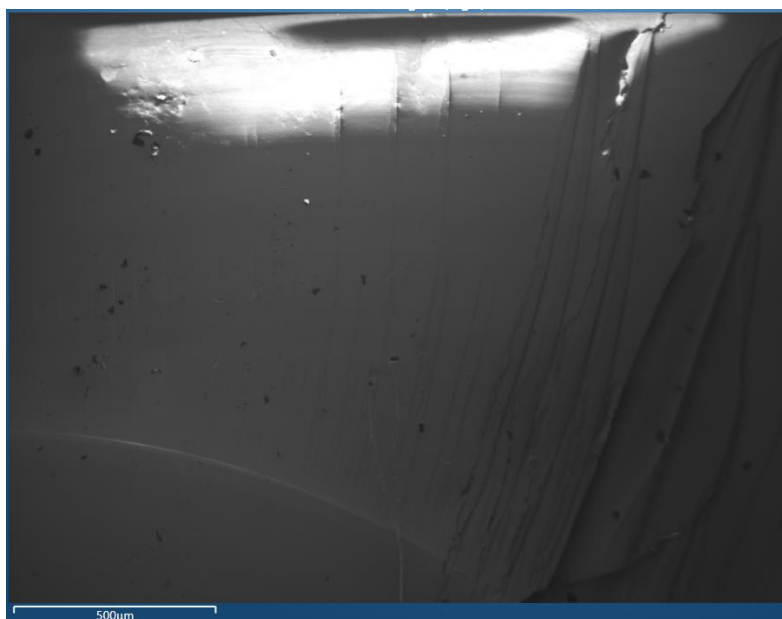


Figura 6. Imagen obtenida con el SEM de la División de policía científica de los Mossos d' escuadra, se observan más de cerca las estrías formadas por el estrés mecánico al momento de ser fragmentado.

Apéndice C. Imagen del ESEM obtenida en los laboratorios de la URV.

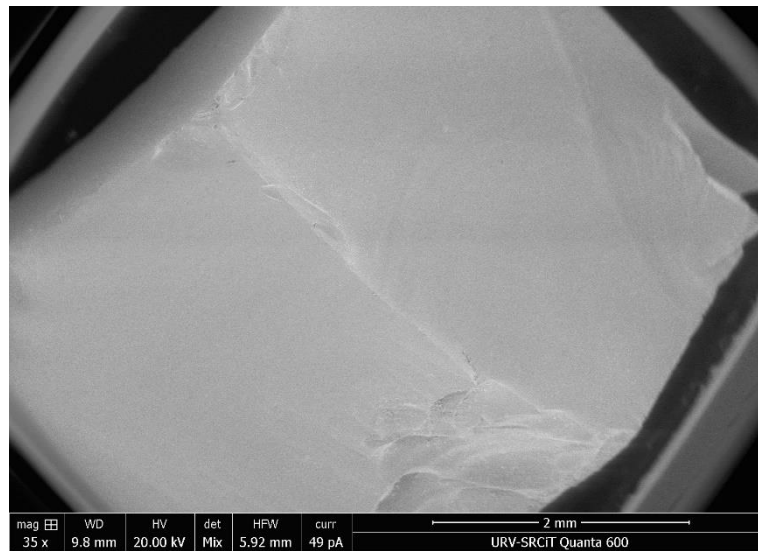


Figura 7. Imagen obtenida con el ESEM del SRCiT de la URV, se observan más de cerca las estrías formadas por el estrés mecánico cuando ha sido al fragmentado.